离心泵前置导叶的正交优化设计

侯虎灿　张永学*　李振林　周鑫　王子哲

（中国石油大学（北京）机械与储运工程学院，北京，102249）

（Tel：010-89733146/18611131756，Email: zhyx@cup.edu.cn）

摘　要：为研究前置导叶各设计参数对离心泵水力性能的影响，对一 IS 系列离心泵运用二元理论自编程序完成其前置导叶的水力设计。应用 $L_9(3^4)$正交表，选取导叶轮毂半径 r，长宽比 R_{lb}，安放角分布规律 n 及出口边速度环量 C_ur 为设计参数，对其进行 4 因素 3 水平正交设计并得到 9 组导叶。对加装导叶的离心泵进行全流道数值计算，以扬程和水力效率为考察目标并利用极差分析影响其水力性能的主次因素，得到最佳方案。对最佳方案下导叶进行加工并试验，结果表明：数值模拟与试验结果基本吻合，综合优化后相比于未加装导叶的离心泵，加装导叶时离心泵扬程变化不大，水力效率提高 1.43%，轴功率减少了 0.83kW，总能耗节能约 2.06%，同时验证了正交优化方法的可行性及可靠性。

关键词：前置导叶；离心泵；正交优化；水力设计；数值模拟

中图分类号：TH311　　　　　**文献标识码：**A

Optimization Design of Inlet Guide Vane in a Centrifugal Pump Based on Orthogonal Method

HOU Hu-Can　ZHANG Yong-Xue　LI Zhen-Lin　ZHOU Xin　WANG Zi-Zhe

(College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to study the influence of inlet guide vane (IGV) parameters on hydraulic performance of centrifugal pump, the hydraulic design of IGV was completed for one IS type centrifugal pump using in-house code based on two dimensional flow theory. The $L_9(3^4)$ orthogonal table was implemented to design nine type of IGVs, which contains four factors with three levels of hub radius r, length-width ratio R_{lb}, setting angle distribution n and velocity circulation C_ur at outlet edge. The whole flow field of centrifugal pump with IGV was numerical simulated at three operating points, and regarding its head and hydraulic efficiency as the evaluation targets and aided by variance analysis, the primary and secondary factors of the researched parameters were acquired and obtained an optimal combination scheme. Then the hydraulic performance experiments for the optimal IGV were carried out and the results show that the numerical results agree well with experimental. Comparing with that without IGV, the head of centrifugal pump with IGV changes not much while the hydraulic efficiency increases obviously by 1.43% and the shaft power decrease by 0.83%, saving the total of energy consumption about 2.06%, which meanwhile verifies the feasibility and reliability of the orthogonal optimization method.

Key words: IGV；Centrifugal Pump；Orthogonal Optimization；Hydraulic Design；Numerical Simulation

0 引言

离心泵广泛应用于各个技术领域，耗能总量巨大，对其进行节能研究有着重大的意义[1]。实际生产由于选型不当、水力设计不合理、实际生产运行条件已严重偏离设计工况要求等原因，多数离心泵在偏离工况运行，运行效率偏低，造成大量能源浪费。实践证明离心泵采用前置导叶预旋调节可有效改善叶轮进口流态，进而改善离心泵及其偏离工况的水力性能。桂绍波[2]对不同预旋角度时前置导叶离心泵进行全流道三维湍流数值模拟，得到的外特性结果与试验数据吻合较好。王海民[3]对不同翼型的前置导叶进行试验研究，表明适当的正预旋调节能够达到离心泵增效节能的目的。

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法，根据正交性挑选试验点并具备“均匀分散，齐整可比”的特性，试验方法高效快速。正交试验法虽在泵设计中得到应用，但还未见前置导叶设计应用的发表成果。戎国平[4]指出通过正交试验可以充分分析各因素对泵性能的影响规律并由最经济的途径得到最佳的结果。张金亚[5]基于正交设计方法采用数值模拟手段对混输泵进行叶轮优化，使混输泵的水力性能得以明显提高。施卫东[6]对高扬程深井离心泵进行正交试验优化设计，并用极差分析找到影响深井泵性能的主次因素，提出了较优设计方案。

基金项目：本研究得到了中国石油科技创新基金研究项目(2012D-5006-0611)和中国石油大学(北京)青年教师专项培养基金项目(NO.KYJJ 2012-04-11)的资助。

笔者以型谱泵 IS150-125-250 为试验对象，基于二元流动理论，自编程序完成弯扭空间前置导叶的水力设计，依据正交性指导设计 9 套前置导叶叶片并全流道数值模拟了加装导叶的离心泵进，探索不同设计参数对泵整体水力性能的影响，提出最佳设计方案。随后加工最佳的前置导叶装置并进行水力性能试验，验证设计方法的可行性及结果的可靠性。

1 前置导叶二元水力设计

轴面流动有势的二元水力设计方法流程如图 1 所示，首先确定导叶初始轴面流道轮廓；再运用准正交线法绘制轴面流网并进行轴面速度迭代计算[7]；再采用逐点积分法进行叶片骨线绘型并沿周向对叶片骨线进行双面加厚；最后对导叶的进出口边进行多次贝塞尔曲线修圆处理，在 Gambit 软件构造得到其三维模型[8]如图 2 所示。设计中导叶出口边采用等环量设计，而进口边为减小的冲击损失，在设计流量下经预旋调节后的叶轮进口满足无冲击条件。

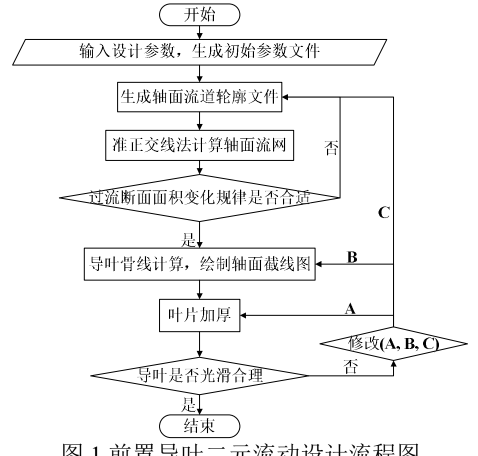


图 1 前置导叶二元流动设计流程图

Fig1 2D theory design flow chart of inlet guide vane

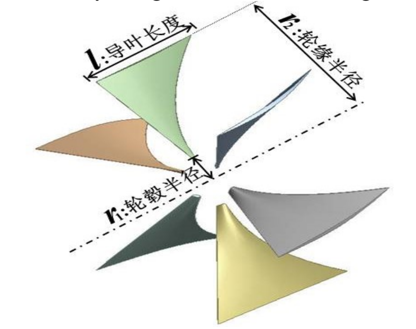


图 2 前置导叶三维结构模型

Fig2Geometry model of the designed inlet guide vane

2 正交设计方案的确定

离心泵前置导叶的正交水力设计优化目的是探求各设计参数对离心泵水力性能的影响。为使设计导叶与其调节的离心泵相匹配，得到的导叶基本设计参数为轮缘直径 150 mm，设计流量 Q_d 200 m^3/h，叶片数 6，进口安放角 90.0° 及轴向距离 200 mm。

前置导叶的主要几何结构设计参数有：轮毂半径 r（r_1），长宽比 R_{lb}（$l/(r_2-r_1)$），叶片安放角沿轴面流线的四次分布规律 n 及出口边的叶片涡 C_ur。导叶结构设计参数的选取是否合理直接影响其水力性能，合适的结构参数的选取能够在牺牲很小扬程的情况下改善离心泵偏离工况的水力性能。对每一设计因素取 3 个水平如表 1 所示，选用 $L_9(3^4)$正交表确定的正交试验方案如表 2 所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Orthogonal experiment factors

水平	因素			
	A	B	C	D
	n	r/mm	R_{lb}	C_ur/m^2/s
1	-1.5	10	0.8	0.1
2	-1.0	15	1.0	0.2
3	0	20	1.2	0.3

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal scheme

编号	代号				编号	代号			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	A_1	B_1	C_1	D_1	6	A_2	B_3	C_1	D_2
2	A_1	B_2	C_2	D_2	7	A_3	B_1	C_3	D_2
3	A_1	B_3	C_3	D_3	8	A_3	B_2	C_1	D_3
4	A_2	B_1	C_2	D_3	9	A_3	B_3	C_2	D_1
5	A_2	B_2	C_3	D_1					

3 数值模拟与计算方法

在正交方案确定的基础上对每种方案下加装前置导叶的离心泵进行数值计算，并使用 Ansys Meshing 进行离心泵网格划分如图 3 所示。

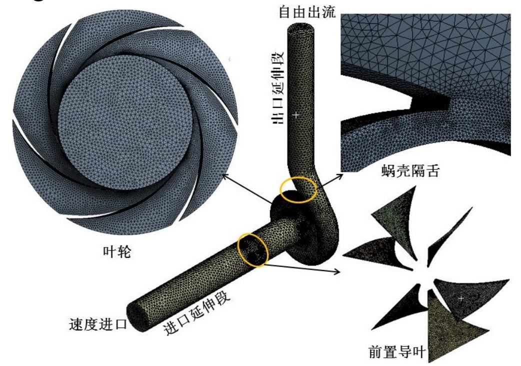


图 3 离心泵泵计算域及网格

Fig 3 The computational domains and meshing grid

利用 Fluent 软件进行全流道流场计算，选用 RNG k-ε 湍流模型和标准壁面函数，采用 MRF 模型进行动静部件耦合，采用 SIMPLEC 算法对压力和速度进行耦合求解。使用 PRESTO!格式对压力项进行离散，二阶迎风格式对对流项进行离散，其余各项均采用二阶中心差分格式。进口给定速度边界条件，出口为边界采用自由出流，固体壁面采用无滑移边界条件，动静交界面上采用 Interface 面进行内部数据传递。

离心泵扬程、轴功率及效率按下式计算：

$$H=\Delta z+\frac{p_2-p_1}{\rho g}+\frac{v_2^2-v_1^2}{2g} \qquad P=\frac{2\pi nM}{60} \qquad \eta=\frac{\rho gQH}{P}$$

式中，H 是扬程，P 是轴功率，η效率，Δz 是离心泵进出口位置的高程差；p_1，p_2，v_1，v_2 是离心泵（含进口导叶）进出口位置的静压值和速度值，M 是扭矩值，n 是转速，ρ是介质的密度。

4 网格无关性验证

为减少计算负荷并确保计算精度，须对计算网格进行无关性验证如表 3 所示。无关性过程中选取的三个特征量分别是扬程 H、水力效率 η_h 及额定工况下叶轮进口截面处的平均叶片涡 C_ur。综合分析选取网格 4 作为后续模拟计算的网格数。

表 3 网格无关性评估

Table 3 Evaluation of the Independency of mesh

Items	Total grid	H/H_4	η/η_4	V_ur/V_ur_4
Mesh 1	1280144	0.9993	1.0008	0.9993
Mesh 2	1469397	1.0014	1.0017	0.9988
Mesh 3	1677027	1.0014	1.0014	0.9997
Mesh 4	1861551	1.0000	1.0000	1.0000
Mesh 5	2077358	0.9993	1.0000	1.0003
Mesh 6	2296194	0.9988	0.9982	1.0017

5 正交设计结果分析

全流道数值计算都是在 0° 预旋角下进行的，而 Q_d 工况计算得到的 9 个设计方案的离心泵扬程和水力效率如表 4 所示。

表 4 额定流量 Q_d 下数值模拟结果

Table 4 Numerical results under the design condition Q_d

编号	H/m	η_h/%	编号	H/m	η_h/%
1	16.27	85.65	6	16.10	85.91
2	15.89	85.90	7	15.03	84.41
3	15.20	85.08	8	15.42	85.44
4	14.61	83.40	9	16.26	85.58
5	16.22	85.74			

由表 4 可以看出扬程最高的是 1 号设计方案，H=16.27 m，而水力效率最高的是 6 号设计方案，η_h =85.91%。为分析各个设计参数对离心泵的性能，并找到主要因素和优化方案，对模拟结果进行极差分析如表 5 所示。表中 K_i 为相应水平 i 的模拟结果之和，M_i 是相应 i 水平结果的平均值，R 为极差。为了直观起见，以因素的水平变化为横坐标，指标平均值为纵坐标的折线图如 4 所示。

由表 5 中极差分析可以看出，离心泵前置导叶的主要设计参数对离心泵整体水力性能的影响规律是不同的，各设计参数对 H 影响的主次顺序为 $DBCA$，对 η_h 影响的主次顺序为 $BDCA$，可见在离心泵前置导叶的设计中应优先考虑导叶轮廓与导叶出口边的叶片涡。就单个因素而言，因素 A：对 H 的影响顺序为 $A_1A_2A_3$，对 η_h 的影响顺序为 $A_1A_3A_2$；因素 B：对 H 的影响顺序为 $B_3B_2B_1$，对 η_h 的影响顺序为 $B_2B_3B_1$；因素 C：对 H 的影响顺序为 $C_1C_2C_3$，对 η_h 的影响顺序为 $C_1C_3C_2$；因素 D：对 H 的影响顺序为 $D_1D_2D_3$，对 η_h 的影响顺序为 $D_1D_2D_3$。综上分析，提高离心泵的水力效率的同时兼顾扬程得到的最佳组合为 $A_1B_2C_1D_1$。

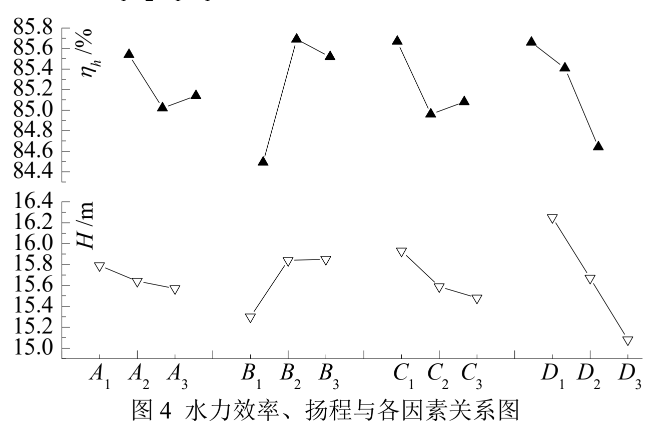


图 4 水力效率、扬程与各因素关系图

Fig 4 Relationship between efficiency/head and parameters

离心泵加装前置导叶预旋调节可有效改善其偏离工况的水力性能，笔者选取小流量工况 0.8Q_d 和大流量工况 1.2Q_d 进行数值计算得到其扬程和水力效率结果如表 6 所示，相应的极差分析如表 7 所示。

由表 7 中极差分析可以看出，在 0.8Q_d 工况各设计参数对 H 影响的主次顺序为 $DBCA$，对 η_h 影响的主次顺序为 $ABDC$。综合单个因素的影响结果可得到提高离心泵的水力效率的同时兼顾扬程得到的最佳组合为 $A_3B_2C_1D_1$。在 1.2Q_d 工况各设计参数对 H 影响的主次顺序为 $DBCA$，对 η_h 影响的主次顺序为 $DBCA$。综合单个因素的影响结果可得出 1.2Q_d 工况各方案模拟数据到的最佳组合为 $A_1B_3C_1D_1$。综合分析 3 中正交试验结果可以得到的最佳组合为 $A_1B_2C_1D_1$，即导叶安放角沿轴面流线的四次分布规律为-1.5，轮毂半径为 15 mm，导叶的长宽比为 0.8，导叶出口边的叶片量为 0.1 m^2/s。

6 优化结果分析

基于正交优化设计的参数组合进行水力设计得到导叶几何模型，并数值计算得到相应预旋下离心泵的性能曲线。为验证正交设计结果的可靠性，注塑加工了一套 0° 预旋角度的最佳导叶，并对加装最佳导叶时离心泵进行有关效率的外特性试验，试验系统流程及相应导叶管段如图 5 所示。未加装及加装优化设计导叶的离心泵水力试验及数值计算得到的性能曲线如图 6、7 所示。

表 5 模拟结果极差分析

Table 5 Range analysis of the numerical results

因素	A	B	C	D	因素	A	B	C	D

H/m	K_1	47.30	45.91	47.79	48.75	η_h/%	K_1	256.63	253.46	257.00	256.97
	K_2	46.93	47.53	46.76	47.02		K_2	255.05	257.08	254.88	256.22
	K_3	46.71	47.56	46.45	45.23		K_3	255.43	256.57	255.23	253.92
	M_1	15.79	15.30	15.93	16.25		M_1	85.54	84.49	85.67	85.66
	M_2	15.64	15.84	15.59	15.67		M_2	85.02	85.69	84.96	85.41
	M_3	15.57	15.85	15.48	15.08		M_3	85.14	85.52	85.08	84.64
	R	0.22	0.55	0.45	1.17		R	0.52	1.20	0.71	1.02

表 6 偏离工况下数值模拟结果

Table 6 Numerical simulation results under the off-design condition

方案编号	$0.8Q_d$		$1.2Q_d$		方案编号	$0.8Q_d$		$1.2Q_d$	
	H/m	η_h/%	H/m	η_h/%		H/m	η_h/%	H/m	η_h/%
1	16.92	81.86	13.64	79.94	6	16.81	82.17	13.23	79.26
2	16.84	82.80	12.91	78.81	7	16.43	82.52	11.95	75.73
3	16.40	82.84	11.97	76.45	8	16.52	82.73	12.25	77.10
4	16.24	81.28	10.88	72.15	9	16.98	82.55	13.68	79.91
5	16.86	82.11	13.51	79.70					

表 7 $0.8Q_d$和 $1.2Q_d$工况下极差分析

Table 7 Range analysis under $0.8Q_d$ and 1.2 Q_d condition

因素		A		B		C		D	
		0.8	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2
H m	K_1	50.16	38.52	49.59	36.47	50.25	39.12	50.76	40.83
	K_2	49.91	37.62	50.22	38.67	50.06	37.47	50.08	38.09
	K_3	49.93	37.88	50.19	38.88	49.69	37.43	49.16	35.10
	M_1	16.72	12.84	16.53	12.16	16.75	13.04	16.92	13.61
	M_2	16.64	12.54	16.74	12.89	16.69	12.49	16.69	12.70
	M_3	16.64	12.63	16.73	12.96	16.56	12.48	16.39	11.70
	R	0.08	0.30	0.21	0.80	0.19	0.56	0.53	1.91

因素		A		B		C		D	
		0.8	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2
η_h %	K_1	247.50	235.20	245.66	227.82	246.76	236.30	246.52	239.55
	K_2	245.56	231.11	247.64	235.61	246.63	230.87	247.49	233.80
	K_3	247.80	232.74	247.56	235.62	247.47	231.88	246.85	225.70
	M_1	82.50	78.40	81.89	75.94	82.25	78.77	82.17	79.85
	M_2	81.85	77.04	82.55	78.54	82.21	76.96	82.50	77.93
	M_3	82.60	77.58	82.52	78.54	82.49	77.29	82.28	75.23
	R	0.75	1.36	0.66	2.50	0.28	1.81	0.33	4.62

从图 6 可的随着流量的增加，加装导叶的离心泵的扬程-流量曲线比未加装导叶时陡峭，随着流量的增加，导叶预旋装置本身带来的水力损失变得明显，导致其扬程下降较快。

图中加装导叶的离心泵效率-流量曲线整体上高于未加装导叶时的效率-流量曲线，说明前置导叶的引入改善了离心泵内流场且使得其高效区拓宽。拟合结果显示，未加装导叶的离心泵的最优工况 Q_{op} 对应的流量为 161.56 m^3/h，效率为 59.78%，扬程为 16.72 m。同流量下加装导叶的离心泵比未加装导叶时效率提高了 1.43%，功耗降低了 0.83kW，节约 6.90%，而扬程下降了 4.84%，所以总能耗节约 2.06%。且在 0.9~1.1Q_{op} 范围内，整体效率都有提高且平均值为 1.07%，此时功率平均节约 0.92kW，平均功耗节约 7.5%，实现了离心泵增效节能的目的。

图 7 的数值结果显示，在 Q_d时扬程与水力效率分别为 16.19 m 与 86.90%，与正交设计 9 种方案计算结果相比，扬程下降不明显，而水力效率提高近一个百分点。在 $0.8Q_d$ 工况时，其扬程与水力效率分别为 17.02 m 与 83.46%，$1.2Q_d$ 工况时，其扬程与水力效率分别为 13.51 m 与 80.74%，与正交设计 9 种方案的结果相比均比较理想，验证了正交设计方法的可行性，运用正交设计方法成功的实现了离心泵前置导叶的优化设计。

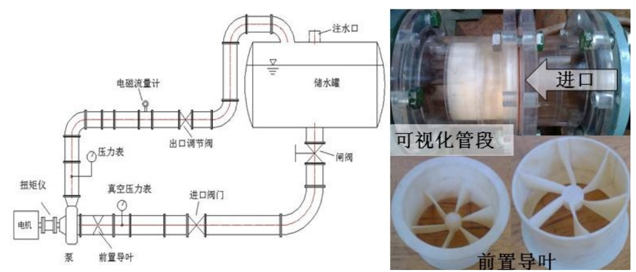


图 5 试验系统流程与导叶

Fig 5 Experimental system flowchart and IGV

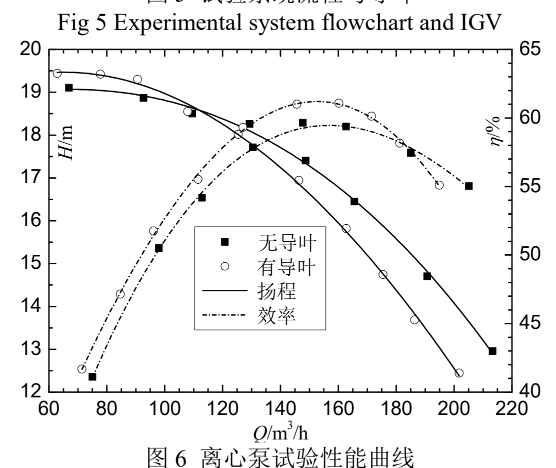


图 6 离心泵试验性能曲线

Fig 6 Experimental performance curves of the centrifugal pump without and with IGV

同时容易得到加装导叶的离心泵其扬程-流量曲线较未加装导叶偏低，扬程值平均减少约 0.6m；效率-流量曲线在额定流量附近明显偏高，说明前置导叶的引入改善了离心泵的内流场且高效区拓宽。拟合数据显示，在额定工况点离心泵水力效率提高了 1.35%，在 0.8~1.2Q_d 流量工况范围内，水力效率平均提高 1.32%，与试验结果吻合较好，说明了数值模

拟方法的可靠性，同时也验证了本文正交水力设计方法的正确性，可见本次正交设计是成功的，达到了预期的目的。

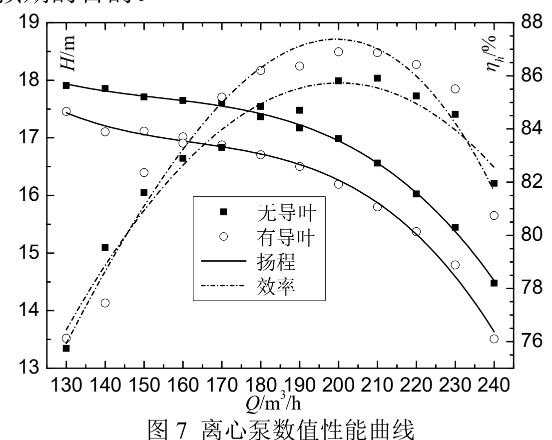


图 7 离心泵数值性能曲线

Fig 7 Numerical performance curves of the centrifugal pump without and with IGV

7 结论

(1) 正交试验设计方法可以成功用于离心泵前置导叶的优化设计中并借助于全流道数值计算得到最佳方案组合 $A_1B_2C_1D_1$，极差详细得到前置导叶轮毂半径与出口边速度环量对设计结果的影响较大。

(2) 数值计算与水力试验结果基本吻合，说明了数值计算结果的可靠性，同时验证了正交水力设计方法在离心泵前置导叶上的成功应用。

(3) 相比于未加装导叶的离心泵，加装时扬程变化不大，最优工况下的水力效率提高明显 1.43%，总能耗节约 2.06%，实现了离心泵增效节能的目的。

参考文献

[1] 袁建平，张改成，陈翔. 离心泵运行调节能耗分析[J]. 排灌机械，2006, 24(5)：44~47.

Yuan Jianping, Zhang Gaicheng, Chen Xiang. Operation adjusting methods for energy consumption of centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006,24(5)：44~47. (in Chinese)

[2] 桂绍波，曹树良，谭磊，等.前置导叶预旋调节离心泵性能的数值预测与试验[J].农业机械学报，2009，40(12):101~106.

GuiShaobo, Cao Shuliang, Tanlei, et al. Numerical Simulation and Experiment of Inlet Guide Vane Pre-whirl Regulation for Centrifugal Pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 101~106.

[3] 王海民，周裁民，黄雄，等.不同翼型前置导叶正预旋对离心泵性能影响[J].农业机械学报，2012，43(11)：129~133.

Wang Haimin, Lin Hao, Huang Xiong, et al. Prewhirl Regulation Experiment of Inlet Guide Vane for Centrifugal Pump Based on Gottingen Airfoil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11): 129~133.

[4] 戎国平.正交试验设计及其在泵研究中的应用[J].排灌机械，1995，13(1)：27~30.

RongGuoping. Orthogonal experimental design and its application in pump research [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995, 31(1): 27~30.

[5] 张金亚，朱宏武，李艳，等.基于正交设计方法的混输泵叶轮优化设计[J].中国石油大学学报：自然科学版，2009，33(6)：105~110.

Zhang Jinya, Zhu Hongwu, Li Yan, et al. Optimization design of multiphase pump impeller based on orthogonal design method [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(6): 105~110.

[6] 施卫东，周岭，陆伟刚，等.高扬程深井离心泵的正交试验与优化设计[J].江苏大学学报：自然科学版，2011，32(4)：400~404.

Shi Weidong, Zhou Ling, Lu Weigang, et al. Orthogonal test and optimization design of high-head deep-well centrifugal pump [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32(4): 400~404.

[7] 张永学，周鑫，姬忠礼，等. 低比转速离心泵的水力设计及性能预测[J]. 排灌机械工程学报，2013, 31（4）：300~304.

Zhang Yongxue, Zhou Xin, Ji Zhongli, et al. Hydraulic design and performance analysis of low specific speed centrifugal pump [J]. Journal of Dranage and Irrigation on Machinery Engineeringt，2013，31（4）：300~304.

[8] 周鑫，张永学，姬忠礼，等. 低比转速离心泵叶轮的水力设计数值方法[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2011, 35（4）：113~118.

ZHOU Xin, ZHANG Yong-xue, JI Zhong-li, et al. Hydraulic design of low specific speed centrifugal pump impeller by numerical method [J]. Journal of China University of Petroleum，2011，35（4）：113~118.